

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАНОПОРОШКОВ МЕДИ ИЗМЕРЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ В ВОЗДУХЕ

И.К. Калинин, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, И.К. Забродина, Д.В. Исмаилов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: avmost@tpu.ru

Нанопорошки металлов после их осаждения в воздухе и коагуляции представляют собой аэрогели, насыпная плотность которых в десятки раз меньше, чем стандартные значения плотностей металлов, например, насыпная плотность нанопорошка алюминия может составлять $0,08 \text{ г/см}^3$. После пассивирования поверхность наночастиц металлов покрыта оксидной оболочкой толщиной от 2 до 10 нм. В свою очередь, покрытые адсорбированными веществами поверхности частиц не контактируют между собой, поэтому в свободно насыпанном состоянии нанопорошки металлов являются широкозонными полупроводниками или диэлектриками. Исследование взаимосвязи термической устойчивости и электропроводности нанопорошков при нагревании в воздухе является важной практической задачей, так как по трудоёмкости измерение температурной зависимости сопротивления менее энергозатратно, чем метод дифференциального термического анализа [1].

В качестве объекта исследований был выбран нанопорошок меди, так как он имеет невысокую температуру начала окисления ($\sim 190^\circ \text{C}$), и при нагревании претерпевает фазовый переход, сопровождающийся изменением валентности меди [2]. Нанопорошки меди перспективны в качестве компонентов паст для нанесения проводников электрического тока по аддитивной технологии, припоев и различных порошковых сплавов. Для меди в массивном состоянии характерна устойчивость к окислению в воздухе. При промышленном использовании нанопорошков меди очевидна необходимость предварительного исследования особенностей физико-химических процессов, протекающих в них при нагревании и взаимодействии с кислородом воздуха, влияния релаксационных процессов в наночастицах и нанопорошках на их устойчивость при транспортировке, хранении и нагревании.

Результаты исследования окисления меди в массивном состоянии при нагревании в воздухе приведены во многих монографиях и статьях, и разработаны достаточно хорошие модели протекающих процессов массо- и электропереноса. Применять же полученные результаты к нанопорошкам меди и системам на основе нанопорошков меди следует с осторожностью: нанопорошки металлов представляют собой метастабильные системы, хотя часть их характеристик может изменяться во времени и непрерывно. Доля атомов на поверхности наночастицы сравнима с долей атомов в объеме. Это приводит к тому, что процессы на поверхности частицы оказывают влияние на всю частицу в целом. Как следствие, металлы в наносостоянии при их активировании проявляют более высокую химическую активность, чем эти же металлы в массивном состоянии. Для исследований были использованы нанопорошки меди, полученные электрическим взрывом медного проводника в среде аргона с помощью установки УДП-4Г [3].

При приложенном постоянном напряжении на прессованный образец нанопорошка сила электрического тока является характеристикой термической устойчивости нанопорошка меди и проводимости материала образца в воздухе. Резкое нарастание электропроводности прессованных образцов меди наблюдалось в диапазоне $250\text{-}260^\circ \text{C}$. В то же время, температура начала окисления свободно насыпанного нанопорошка меди составляла 190°C . Таким образом, нанопорошки меди не могут быть использованы в виде датчиков температуры, потому что при нагревании – охлаждении процессы протекают необратимо.

Экспериментальные результаты, полученные в результате измерения изменения проводимости прессованного нанопорошка в зависимости от температуры, согласуются с результатами дифференциального термического анализа. Это свидетельствует об однозначной зависимости проводимости нанопорошка меди от протекающих в нем химических превращений, что позволяет рекомендовать этот метод исследования в качестве экспресс-диагностики нанопорошков меди.

Необходимо отметить, что применимость этого метода для диагностик других нанопорошков, в том числе модифицированных высокоэнергетическими излучениями [4], требует дополнительной проверки. Тем не менее, в сочетании с такими методами, как дифференциальный термический анализ, электрохимические методы исследования, рентгеноструктурный и рентгенофазовый [5] анализы, предложенный в статье метод может быть использован для исследования физико-химических процессов, протекающих в нанопорошках при нагревании и окислении.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, проект № 11.1928.2017/4.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уэндландт У. Термические методы анализа. – Москва: Мир, 1978. – 527 с.
2. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности. Часть 2. – Москва: Изд-во ин. лит., 1963. – 276 с.
3. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение. – Томск: Изд-во ТГУ, 2005. – 148 с.
4. Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Пак А.Я. Влияние однородных магнитного и электрического полей на микроструктурные и субструктурные характеристики продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе // ЖТФ. – 2016. – Т. 86. – Вып. 12. – С. 95–98.
5. Мостовщиков А.В., Ильин А.П., Захарова М.А. Запасание энергии нанопорошком алюминия в напряженно-деформированном состоянии кристаллической решетки // Известия ТПУ. Инжиниринг. – 2016. – Т. 327. – № 2.– С. 77–82.